

배전선로 인덕턴스 예측 및 커패시터뱅크 위치추정

- 허 건 / 미국 EPRI PDU 섹터 프로젝트 매니저
- 이수형 / 연세대 석·박사통합과정
- 박정욱 / 연세대 교수

1. 서론

커패시터 뱅크는 배전계통에서 부하 측의 낮아진 전압 및 역률을 보상하기 위해 오랜 시간동안 널리 사용되어 왔다. 커패시터 뱅크는 투입되는 순간 선로에 일시적인 전압강하를 발생시키고 이로 인하여 전압의 과도현상이 일어난다. 커패시터 뱅크의 보급에 따라 이러한 전압강하와 과도현상은 전력시스템에서 빈번하게 발생하는 왜란 중 하나가 되었으며, 이러한 왜란은 한 주기의 내부(subcycle)에서 일어나는 과전압 과도현상에 대하여 내성이 없는 부하들의 잘못된 동작을 야기한다. 이러한 예기되는 문제점에도 불구하고, 불행하게도 전력계통에서는 이러한 왜란과 커패시터 뱅크 연결동작과의 상호 연관성을 규명하는 데에 사용할 효율적인 방법이 존재하지 않았다.

제시된 주제에 관한 연구는 현재까지 활발하게 이루어지지 않았지만, 주목할 만한 가치가 있는 몇몇 연구가 있다. Parsons [1]는 과도기간 동안의 왜란 에너지 흐름과 왜란 에너지의 초기 첨두치 극성을 활용하여 커패시터 뱅크의 상대적인 위치를 선정하였다. Sochuliakova [2]는 과도 주파수에 대한 함수로 커패시터의 위치를 표현하였으며, 이러한 함수는 선로의 인덕턴스, 저항, 및 커패시터 뱅크의 사이즈를 비롯해 부하의 크기도 이미 알고 있다는 가정하에 성립된다. 이 방법은 시스템의 동적 방정식을 통해 고유값(eigenvalue)을 구할 필

요가 있다는 점에서 실제 상황에 적용하기 어렵다.

본 원고는 효율적 알고리즘을 제안한 기존의 논문을 바탕으로 작성되었으며 [3], 제안된 알고리즘은 전력품질 데이터(즉, 커패시터 투입에 따른 과도 전압파형)를 이용해 커패시터 뱅크의 정확한 위치를 추정할 수 있다. 제안된 알고리즘은 커패시터 뱅크의 투입에 따른 초기 전압 변화의 정도가 측정 지점과 커패시터 뱅크간의 거리에 의해 결정된다는 물리적 특성에 기초해 개발되었다.

2. 커패시터 뱅크 위치추정

커패시터의 물리적인 특성으로 인하여, 충전되지 않은 커패시터 뱅크가 배전선로에 투입된 직후의 투입지점의 순간전압은 0이며, 이로 인하여 안정 상태에 도달하기 까지 해당 전압은 과도현상을 보인다. 이러한 순간적인 전압강하와 이에 따른 전압의 과도현상은 특정 부하의 오작동의 원인이기도 하나, 역설적으로 문제를 일으키는 커패시터 뱅크의 정확한 위치를 추정하는데 사용될 수 있다.

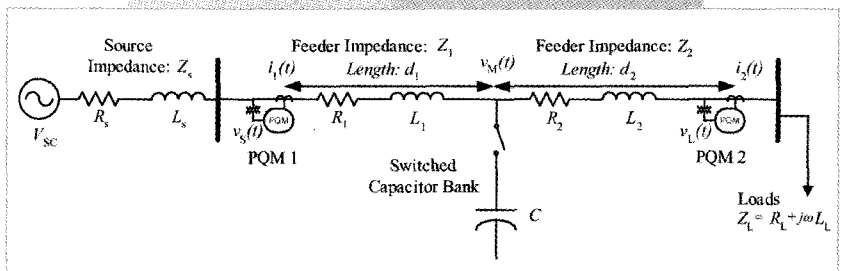


그림 1 전력품질측정기(PQM 1, PQM 2)와 커패시터 뱅크가 설치된 배전선로

그림 1에서 커패시터 뱅크의 투입에 따라 PQM 1에서 측정되는 전압은 PQM 1과 커패시터 뱅크의 투입지점 사이에 존재하는 임피던스로 인해 0보다 큰 값을 가지게 되며, 커패시터 뱅크의 투입지점이 PQM 1과 가까울수록 측정되는 전압은 0에 근접하게 된다. 따라서 이를 근거로 PQM 1에서 측정된 초기 전압의 변화를 통해 PQM 1을 기준으로 한 커패시터 뱅크의 위치를 추정할 수 있다. 그림 2는 커패시터 뱅크의 투입에 따른 PQM 1에서 측정된 전압의 변화를 보여준다.

임의의 배전계통이 균형을 이룬 시스템 (balanced system)임을 가정하면, 해당 계통을 그림 1과 같이 단선도로 표현할 수 있다. R_s 및 L_s 는 전력 공급원의 등가 임피던스를 나타내며, 선로 임피던스는 길이에 비례하여 $(r+jwL)dl=R_1+jwL_1$ 및 $(r+jwL)dl_2=R_2+jwL_2$ 로 나타낸다. 여기서 r 및 L 는 단위길이의 저항 및 인덕턴스를 뜻하고, d_1 및 d_2 는 각각 커패시터 뱅크로부터 PQM 1 및 PQM 2까지의 거리를 나타낸다.

PQM 1에서 측정된 전압을 $v_s(t)$, 전력공급원의 전압을 $v_{sc}(t)$ 로 각각 나타낼 때, s-도메인에서의 두 전압의 관계는 식 (1)로 나타낸다.

$$V_s(s) = V_{sc}(s) \left[\frac{L_1 C s^2 + R_1 C s + 1}{(L_1 + L_c) C s^2 + (R_1 + R_c) C s + 1} \right] \quad (1)$$

$$\approx \frac{v_s(t_0^-)}{s} \left[\frac{L_1 C s^2 + R_1 C s + 1}{(L_1 + L_c) C s^2 + (R_1 + R_c) C s + 1} \right]$$

$$= \frac{v_s(t_0^-)}{s} \cdot \frac{v_s(t_0^-)}{(L_1 + L_c)} \left[\frac{(L_c s + R_c)}{s^2 + \frac{R_c + R_1}{L_c + L_1} s + \frac{1}{(L_c + L_1) C}} \right]$$

여기서 $v_s(t)$ 는 커패시터 뱅크의 투입 직전 PQM 1에서 측정된 시스템 전압이며, $v_{sc}(t)$ 를 대신하는 값이다. 단, 측정전압은 $v_{sc}(t)$ 로부터의 전압강하가 거의 없다는 전제하에 $v_{sc}(t)$ 를 대신한다. 커패시터 뱅크 투입에 따른 과도전압의 주파수는 시스템에서 공급되는 전압의 주파수에 비해 매우 높은 값을 나타내므로, 커패시터 뱅크 투입 순간의 시스템 전압은 거의 일정하게 유지된다. 따라서 식 (1)은 단위 계단함수 (unit-step)에 대한 타임도메인에서의 전달함수로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_s(t) = v_s(t_0^-) - K v_s(t_0^-) e^{-\zeta \omega_n (t - t_0^+)} B \quad (2)$$

여기서 ω_n 은 고유공진주파수이며 ζ 는 시스템 감쇠

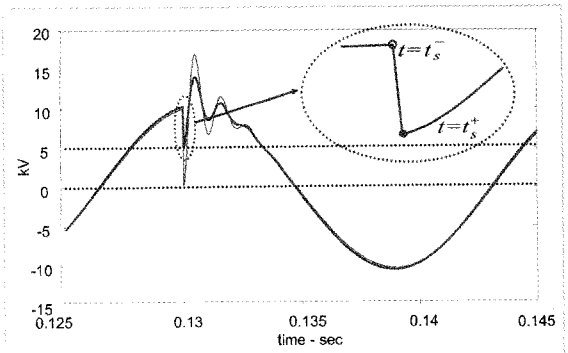


그림 2 PQM 1에서 측정된 커패시터 뱅크 투입에 따른 전압의 변화

비를 나타낸다. 즉,

$$w_n^2 = \frac{1}{(L_c + L_1)C}, \quad \zeta = \frac{1}{2w_n} \left(\frac{R_c + R_1}{L_c + L_1} \right) \quad (3)$$

또한, 파라미터 k, ω_n, B 는 다음과 같이 정리된다.

$$K = \frac{L_c}{L_1 + L_c}, \quad \omega_n = \omega_s \sqrt{1 - \zeta^2}, \quad (4)$$

$$B = \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} - \frac{1}{K} R_c C \frac{w_n}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \right) \times \sin(\omega_n(t - t_0^+)) \cdot \cos(\omega_n(t - t_0^+))$$

따라서 식 (2)로부터, 커패시터 뱅크 투입 직후에 PQM 1에서 측정되는 전압 $v_s(t)$ 은 식 (5)로 나타낸다.

$$v_s(t_0^+) = \frac{L_1}{L_c + L_1} v_s(t_0^-) \quad (5)$$

식 (5)에 의해 선로 인덕턴스 L_1 의 추정 값 $\hat{L}_1 = d_1 L_w$ 은 다음과 같이 정리된다.

$$\hat{L}_1 = \frac{|v_s(t_0^+)|}{|v_s(t_0^-) - v_s(t_0^+)|} L_c = \frac{|v_s(t_0^+)|}{\Delta v_{s,t_0}} L_c = \kappa L_c \quad (6)$$

따라서 PQM 1에서 커패시터 뱅크 투입 지점까지의 추정 거리는 식 (7)로 나타나며, 이는 커패시터 뱅크 투입 직전과 직후의 전압만을 이용해 투입 위치를 추정할 수 있음을 의미한다.

$$d_1 = \frac{\hat{L}_1}{L_w} = \kappa \frac{L_c}{L_w} \quad (7)$$

앞선 해석은 그림 1에서 커패시터 뱅크가 투입되는 지점을 기준으로 부하 쪽 선로와 그에 연결되어 있는 성분을 모두 무시하고 유도한 결과이나, 앞서 무시한 성분을 모두 고려하여 해석하여도 동일한 결과를 얻을 수 있다. 이에 대한 유도 과정은 [3]에 자세히 설명되어 있으므로, 본 원고에서는 생략한다.

3. 제안된 방법의 적용 및 구현

전형적인 전력품질 측정 장비는 넓은 범위에 걸쳐서 많은 왜란들을 측정하므로, 제안된 방법을 적용하기 위해서는 측정된 왜란들 중 커패시터 뱅크의 투입에 의한 왜란만을 식별하기 위한 알고리즘이 요구된다. 그림 3은 제안된 방법의 적용 및 구현을 위한 알고리즘을 나타낸다. 해당 알고리즘의 입력에 쓰이는 전력품질 데이터로는 이미 측정된 데이터뿐만 아니라, 웹 베이스 (web-based) 측정 장비를 통해 얻어지는 실시간 데이터도 사용할 수 있다. 일단 커패시터 뱅크의 투입에 의한 왜란이 식별되면 전압파형의 과도성분을 추출할 수 있다. 추출된 과도성분을 이용하여 커패시터 뱅크의 상대적 위치를 판단하고, 상대적 위치가 부하 쪽에 존재하면 식 (6), (7)을 통해 선로임피던스 예측을 통한 거리 추정을 한다.

제안된 알고리즘의 실제시스템 적용을 위해서는, 거

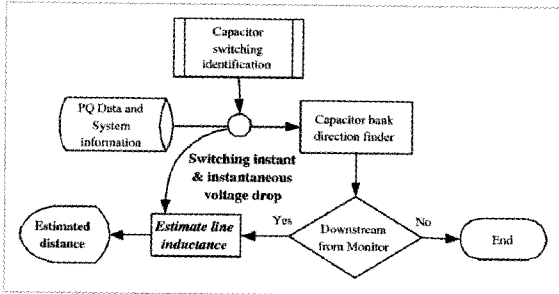


그림 3 커패시터 뱅크 위치 추정을 위한 데이터 처리 흐름도

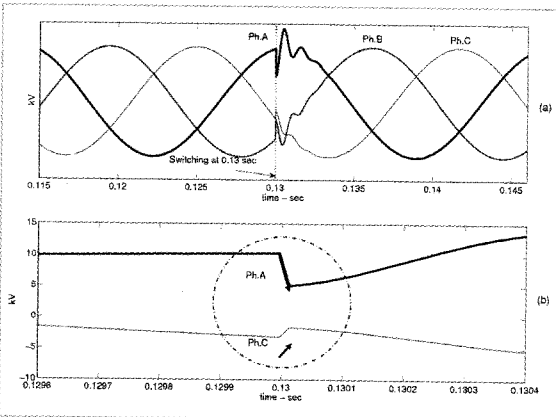


그림 4 커패시터 뱅크 투입에 따라 PQM 10에서 측정된 전압파형

리 추정에 있어 삼상을 모두 고려할 것이 요구된다. 그림 4에서 보여주듯이 커패시터 뱅크가 투입될 때 순간 전압이 높은 위상에서는 전압의 변화량, 이 크게 나타나지만, 순간전압이 낮은 위상에서는 전압의 변화량이 작게 나타난다. 따라서 각 위상에서 추정된 커패시터 뱅크까지의 거리는 다르게 나타날 수 있다. 본 원고에서는 좀 더 정확한 추정 결과를 얻기 위해, 각 상에서 추정된 거리들 중 서로 가까운 값만을 산술평균하여 최종적으로 거리를 산출하는 방법을 사용하였다.

4. 모의실험 및 유효성 검증

그림 5는 제안된 방법의 유효성을 검증하기 위한 배전시스템이다. 시스템에 적용된 변압기는 12 MVA 115/12.47 kV 델타-와이 형 이며, 전원의 등가 인덕턴스와 선로의 1마일 당 인덕턴스는 각각 3.4372 mH 와 1.6801 mH/mi 이다. 그림 5의 Line 2와 이에 연결된 부하가 삼상 평형을 이룰 때, 커패시터 뱅크의 투입에 따른 전압의 변화와 이를 이용해 추정한 의 값은 표 1을 통해 제시된다.

샘플링 비율에 따른 차이는 있으나, 제시된 결과는 제안된 방법이 커패시터 뱅크의 위치를 효과적으로 추정할 수 있음을 보여준다. 및 의 값에 변화를 주었을 때에도 제안된 방법은 효과적으로 커패시터 뱅크의 위

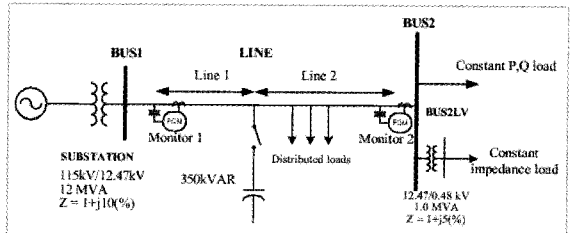


그림 5 커패시터 뱅크가 추가된 IEEE 배전 시스템

표 1 샘플링 비율에 따른 추정 결과 (단, = 2 mi. = 4 mi)

	256 samples/cycle	512 samples/cycle	1024 samples/cycle
$V_{abc}(kV)$	10.25, -7.29, -2.96	10.28, -7.19, -3.08	10.30, -7.12, -3.18
$V_{bc}(kV)$	6.22, -4.24, -1.98	5.35, -3.61, -1.74	5.08, -3.41, -1.67
$x(\text{ratio})$	1.47	1.04	1.00
$d(\text{mile})$	3.01	2.14	2.05

치를 추정하였으며, 삼상 불평형 상태의 부하가 연결되어 있는 경우에도 효과적으로 추정을 하였다[3].

5.결 론

본 원고에서는 전력품질 측정기로부터 커패시터 뱅크의 투입지점까지의 거리를 추정하기 위한 효율적이고 정확한 방법을 제안하였다. 본 원고의 바탕이 된 논문은 커패시터 뱅크의 위치를 결정함에 있어서 커패시터 뱅크의 투입에 따른 초기 전압변화를 분석하여 활용한 최초의 논문이다. 제안된 방법의 유효성은 다양한 길이의 배전선로와 다양한 부하의 상태 및 커패시터 뱅크의 용량을 비롯하여 여러 형태의 회로구성에 대한 적용을 통해 검증되었다. 여러 상황에서의 검증 과정을 통해 추정된 거리는 이론적으로 계산한 결과와 거의 일치 하였다. 추정 결과의 정확도는 측정된 파형에 대한 샘플링 비율에 영향을 받았으며, 높은 샘플링 비율을 사용할수록 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 제안된 알고리즘은 주기 당 샘플링 비율이 256이상인 기존의 전력 품질 측정 장비에 바로 적용할 수 있으며, 전

력 품질 측정 장비의 지속적인 데이터 수집 능력 개선에 따라 거리 추정 능력의 정확도는 지속적으로 향상될 수 있다는 장점이 있다.

참고문헌

1. A. C. Parsons, W. M. Grady, E. J. Powers, and J. C. Soward, "A direction finder for power quality disturbances based upon disturbance power and energy," IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 3, pp. 1081-1085, Jul. 2000.
2. D. Sochuliakova, D. Niebur, C. Nwankpa, R. Fischl, and D. Richardson, "Identification of capacitor position in a radial system," IEEE Trans. on Power Del., vol. 14, no. 4, pp. 1368-1373, Oct. 1999.
3. K. Hur and S. Santoso, "Distance Estimation of Switched Capacitor Banks in Utility Distribution Feeders," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 22, no. 4, pp. 2419-2427, Oct. 2007.